ÜBER DIE

ELEKTROMOTORISCHE KRAFT,

DEN

WIDERSTAND UND DEN NUTZEFFEKT

VON LADUNGSSÄULEN

(ACCUMULATOREN).

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

MATHEMATISCHEN UND
NATURWISSENSCHAFTLICHEN FACULTÄT

DER

KAISER-WILHELMS-UNIVERSITÄT STRASSBURG

ZUR ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT VON

WILHELM HALLWACHS

AUS DARMSTADT.

BERLIN 1883.

GEDRUCKT IN DER REICHSDRUCKEREI.

ÜBER DIE
ELEKTROMOTORISCHE KRAFT,
DEN
WIDERSTAND UND DEN NUTZEFFEKT
VON LADUNGSSÄULEN
(ACCUMULATOREN).

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

MATHEMATISCHEN UND
NATURWISSENSCHAFTLICHEN FACULTÄT

DER

KAISER-WILHELMS-UNIVERSITÄT STRASSBURG

ZUR ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT VON

WILHELM HALLWACHS

AUS DARMSTADT.

BERLIN 1883.

GEDRUCKT IN DER REICHSDRUCKEREI.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552716_0088

Die erste Ladungssäule wurde schon 1803, drei Jahre nach Entdeckung der Elektrolyse, von Ritter gebaut. Später hat Sinsteden[1]) darauf aufmerksam gemacht, dafs Voltameter, deren Elektroden aus Blei, Silber oder Nickel bestehen, Ladungssäulen liefern, welche zur Erzeugung starker Ströme geeignet sind. Planté[2]) hat dann von 1859 ab eingehende und mühevolle Versuche mit Ladungssäulen gemacht, die aus Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure bestanden. Sie führten ihn zu einem Verfahren, die Bleiplatten so zu präpariren, dafs die Säule anhaltendere Polarisationsströme liefert. Dieses Verfahren ist sehr umständlich und erfordert einen grofsen Arbeitsaufwand. Aufserdem sind die schliefslich auf der Oberfläche der Bleiplatten gebildeten Schichten von schwammigem Blei verhältnifsmäfsig dünn. Faure hat eine Verbesserung dieser Elemente dadurch erreicht, dafs er beide Elektroden von vornherein mit Mennige bedeckt. Die Formirung wird dadurch wesentlich beschleunigt, aufserdem aber das Element für eine stärkere Ladung befähigt, weil die auf der Oberfläche der Elektroden gebildete

[1]) Poggendorffs Annalen, Bd. 92, S. 16.

[2]) Comptes rendus Bd. L., S. 640 u. A.; G. Planté, Recherches sur l'électricité.

Schicht von schwammigem Blei und Oxyden desselben viel dicker ist.

Ueber diese neueren Ladungssäulen lagen erst sehr wenige Untersuchungen vor. Namentlich fehlte es an Beobachtungen ihres Nutzeffektes. Ich habe daher auf Anregung des Herrn Professor Kundt Untersuchungen über die elektromotorische Kraft, den Widerstand und den Nutzeffekt von Ladungssäulen angestellt. Während meiner Arbeit erschienen Berichte über eine Bestimmung des Nutzeffektes, welche die Herren Allard, Le Blanc, Joubert, Potier und Tresca[1]), sowie über eine gröfsere Anzahl derselben, welche die Herren Prof. W. E. Ayrton und John Perry[2]) vorgenommen hatten. Die Herren Gladstone und Tribe haben über die chemischen Vorgänge in den Ladungssäulen gearbeitet.[3]) Ich selbst habe über die letzteren keine Untersuchungen angestellt.

Es standen mir zwei Elemente von Tommasi, ein gröfseres und ein kleineres von Bréguet, sowie zwei verschieden präparirte von Herrn Otto Schulze dahier zur Verfügung.

Die Schulze'schen Elemente bestanden aus einer Serie von Bleiplatten, von denen die erste, dritte, fünfte u. s. w. unter sich und die zweite, vierte, sechste u. s. w. unter sich metallisch verbunden waren. Diese Platten besafsen 20 cm Höhe und 10 cm Breite und waren in einen viereckigen Kasten eingesetzt. Das erste Element (No. I) hatte fünf Platten, auf die 1 kg Mennige aufgetragen war. Damit diese besser haften blieb, waren die Platten waffelartig eingepreſst worden. Das Element wog

[1]) Comptes rendus, Bd. XLIV., S. 600; La lumière électrique, Bd. 6, No. 10.

[2]) Philosophical Magazine (V), Bd. 14, S. 41.

[3]) Nature, Bd. 25, S. 221 u. 461, Bd. 26, S. 603.

mit Säure 8,1 kg. Das zweite Element (No. IV) hatte 30 Platten, die für die Herstellung gekratzt, dann mit Schwefelblumen bestreut und erhitzt wurden, so dafs sich auf der Oberfläche eine Schicht von Schwefelblei bildete. Bei der Ladung des aus diesen Platten hergestellten Elementes wird zunächst der Schwefel wieder ausgeschieden. Das Element wog mit Flüssigkeit 10,5 kg.

Bei den Elementen von Tommasi (No. II) stehen zwei viereckige Rahmen von 30 cm Höhe und 30 cm Breite, die aus viereckigen, fingerdicken Bleistäben gebildet sind, in parallelepipedischen Kästen von Hartgummi. Die beiden vertikalen Seiten eines jeden Rahmens sind durch 500 bis 600 von oben nach unten dicht aufeinander folgende Bleilamellen von etwa 0,3 mm Dicke und 15 mm Breite verbunden. Eine Berührung der beiden so gebildeten Platten wird durch dazwischen stehende Stäbe von Hartgummi verhindert. Ein Element wog mit Montirung 21,4 kg.

Bei den Elementen von Bréguet (No. III) bestanden die beiden Elektroden aus einfachen Bleiplatten, die durch zwischengelegte Kautschukstreifen an der gegenseitigen Berührung gehindert und dann spiralig aufgewunden in einen Glaszylinder gesetzt waren. Das gröfsere Element wog 4,9 kg. Sowohl diese Elemente als auch die von Tommasi waren auf Planté'sche Weise präparirt worden.

Zum Füllen der Elemente wurde eine mit 10 Volumen Wasser verdünnte Schwefelsäure verwendet.

Bevor ich zur Mittheilung der Versuchsanordnung übergehe, seien hier die im Folgenden gebrauchten Bezeichnungen zusammengestellt. Es bedeuten:

1. Bei der Ladung:

J die Intensität,
W den Widerstand der Ladungssäule,
E ihre elektromotorische Kraft,
E' die Potenzialdifferenz an den Enden der geschlossenen Säule,

} in einem bestimmten Moment,

also $E' = E + JW$.

(J_0) die mittlere Intensität
(E_0) die mittlere elektromotorische Kraft

} während der Ladung,

T die Ladungsdauer.

2. Bei der Entladung sind die entsprechenden kleinen Buchstaben genommen. Es ist hier aber:

$$e' = e - iw,$$

wie ohne Weiteres ersichtlich.

Der äufsere Widerstand, durch den sich das Element entladet, ist mit r bezeichnet.

Alle Gröfsen sind in den vom internationalen Kongrefs der Elektriker festgesetzten Einheiten[1]) angegeben. Als Einheit der Stromarbeit ergiebt sich dann

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Sekunde} = \frac{1}{g} \text{ Kilogrammmeter.}$$

Bei nöthigen Umrechnungen wurden die Beziehungen

1 S.-E. = 0,972 Ohm,
1 Daniell = 1,12 Volt

angewendet.[2]) Ohm, Volt und Ampère sind durch ihre Anfangsbuchstaben bezeichnet.

---

[1]) Wiedemanns Annalen, Bd. 14., S. 708, 1881.
[2]) Kohlrausch, Leitfaden.

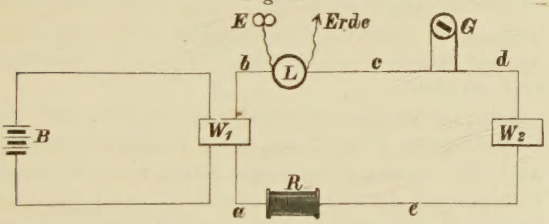
Versuchsanordnung und Methode.

Während der Ladung und der Entladung wurden in bestimmten Zeitintervallen folgende Gröfsen nach den später beschriebenen Methoden gemessen:

1. der Widerstand der Ladungssäule,
2. die Stromintensität,
3. die Potenzialdifferenz an den Enden der geschlossenen Säule.

Letztere Messung war während der Entladung nur bei grofser Intensität (i) nöthig, weil sich

Fig. 1.



dann der äufsere Schliefsungskreis zu stark erwärmte, um den Werth von e' aus i und r nach der Formel $e' = ir$ richtig berechnen zu können, wie es bei schwächeren Strömen geschah.

Aus den beobachteten Gröfsen wurden die elektromotorische Kraft und der Nutzeffekt, wie es weiter unten angegeben ist, berechnet.

Obiges Schema, Fig. 1, zeigt die Versuchsanordnung:

B Batterie bezw. Gramme'sche Maschine, die zum Laden dient,

W_1 und W_2 Pohl'sche Wippen ohne Kreuz, um B bezw. eine Wheatstone'sche Brückenkombination aus- und einschalten zu können,

R ein Siemens'scher Stöpselrheostat,

L die zu untersuchende Ladungssäule,

E Elektrometer,
G Galvanometer;
der geschlossene Kreis *a b c d e* soll als Hauptleitung bezeichnet werden.

Die Intensitäten wurden mittels des Galvanometers *G* von Sauerwald gemessen, welches sich in einem Nebenschlufs der Hauptleitung befand. Der Widerstand zwischen den beiden Abzweigungspunkten war sehr klein gegen den der Verzweigung mit dem Galvanometer. Wurde nicht eine Bunsen'sche Batterie, sondern die Gramme'sche Maschine zum Laden benutzt, so schwankte die Intensität entsprechend den Explosionen in dem Gasmotor, welcher die Maschine trieb. Die starke Dämpfung des Galvanometers machte indefs eine Ablesung auf 0,5 % Genauigkeit möglich.

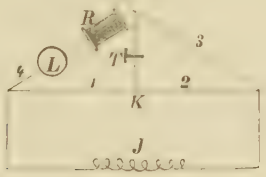
Die Galvanometerausschläge wurden mit zu Grundlegung einer S.-E. eines Stöpselrheostaten und der elektromotorischen Kraft eines Normal-Daniells auf Ampère zurückgeführt, und zwar in folgender Weise. Mehrere neben einander geschaltete Daniell'sche Elemente, deren elektromotorische Kraft unmittelbar vorher mittels eines Elektrometers bestimmt worden war, schickten einen Strom durch die Hauptleitung. Der von demselben bewirkte Galvanometerausschlag wurde abgelesen, darauf der Widerstand des Stromkreises bestimmt, der Galvanometerausschlag und die elektromotorische Kraft der offenen Batterie nochmals beobachtet, sodann aus den Mitteln der korrespondirenden Bestimmungen die Intensität in Ampère berechnet. Diese Operation habe ich während der Versuche mehrfach wiederholt.

Die Potenzialdifferenzen wurden mittels eines Mascart'schen Quadrantenelektrometers (*E* des Schemas) gemessen. Ein Ende der sekundären

Säule war stets zur Erde abgeleitet (durch einen Draht, der zur Gasleitung führte), das andere mit der Nadel des Elektrometers in Verbindung gebracht. Ein Kommutator gestattete, die Verbindungen zu vertauschen. Die hierbei erhaltenen Elektrometerausschläge nach entgegengesetzten Seiten stimmten mit einander überein.

Eine Batterie von 100 isolirt aufgestellten Daniell'schen Elementen, deren Mitte zur Erde abgeleitet war, brachte die beiden Quadrantenpaare auf entgegengesetzt gleiches Potenzial. Mittels eines Normal-Daniells wurde von Zeit

Fig. 2.



zu Zeit untersucht, in wie weit diese Batterie konstant blieb; sobald eine Aenderung in der Ladung der Quadranten eintrat, wurde die Batterie frisch zusammengesetzt.

Die elektromotorischen Kräfte wurden mit derjenigen eines Normalelementes verglichen, dessen elektromotorische Kraft zu 1,12 Volt angenommen wurde. Als solches diente theils ein »hoher Daniell«[1]), theils ein Daniell mit Heber. Die Konstanz dieser Elemente wurde öfters kontrolirt. Ein Normal-Daniell bewirkte einen Elektrometerausschlag von 55 bis 60 mm; dieser Ausschlag wurde während der einzelnen Versuche öfters ermittelt.

Die Widerstandsmessungen wurden in der Wheatstone'schen Brücke mit Telephon und

[1]) Beschrieben von König, Wied. Ann. 16. S. 16. 1882.

Wechselströmen ausgeführt[1]), und zwar nach obenstehendem Schema, Fig. 2. Zweig 1 und 2 bestanden aus einem durch einen Kontaktklotz K getheilten, ausgespannten Neusilberdraht von 1 m Länge und 1,50 O. Widerstand. Zweig 3 war ebenfalls ein ausgespannter Neusilberdraht, von dem beliebige Intervalle benutzt werden konnten; er besafs im Ganzen etwas über 1 O. Widerstand. Zweig 4 ist die Hauptleitung des Schema Fig. 1, die mittels der Wippe W_2 in die Brückenkombination eingefügt werden konnte. Die Neusilberdrähte waren durch Vergleichung mit zwei Stöpselrheostaten kalibrirt worden. Als Stromerreger diente ein kleiner, im Nebenzimmer aufgestellter Induktionsapparat (J), dessen primäre Spirale 0,57, dessen sekundäre 387 O. Widerstand besafs. Die Zahl der Unterbrechungen betrug gewöhnlich etwa 100 in der Sekunde, und konnte von 70 bis 130 verändert werden. Das Telephon (T) hatte zwei Rollen von 3,79 und 3,74 O. Widerstand, welche neben einander geschaltet wurden. Mit den dünnen Zuleitungsdräthen zum Telephon besafs dann der Brückenzweig im Ganzen 2,89 O. Widerstand. In den Zweig 4 wurde gewöhnlich noch 1 S.-E. aus dem Rheostat R zugefügt, um die durch das inkonstante Element selbst im Telephon erregten Töne abzuschwächen.[2]) Diese S.-E. war induktionsfrei, und genügte meist vollständig, um die Einstellung des Kontaktes K auf das Minimum der Tonstärke im Telephon bis auf 0,5 mm genau zu ermöglichen, wodurch eine Genauigkeit der Widerstandsbestimmung von 0,2 % erreicht wurde. Es er-

[1]) Wietlisbach, Inauguraldissertation, Zürich 1879. Berliner Monatsberichte 1879, S. 280. F. Kohlrausch, Wied. Ann., Bd. 11, S. 653, 1880. Lefs, Wied. Ann., Bd. 15, S. 80, 1882.

[2]) Lefs, Wied. Ann., Bd. 15. S. 83, 1882.

gaben z. B. vier Messungen des Widerstandes einer Ladungssäule + einem Stück Neusilberdraht die Werthe: $w = 1{,}135,\ 1{,}135,\ 1{,}136,\ 1{,}134$ O.

Die Widerstandsmessungen wurden so ausgeführt, dafs die ganze Hauptleitung mittels der Wippe W_2 als Zweig 4 in die Brückenkombination eingefügt wurde. Im Falle der Ladung war vorher selbstverständlich die Ladungsbatterie bezw. Maschine mit Hülfe von W_1 ausgeschaltet worden. Es ging dann allerdings zur Zeit der Widerstandsmessung ein Strom von anderer Stärke durch die Säule als in dem Augenblick, für welchen die Kenntnifs des Widerstandes gewünscht wurde. Um zu sehen, ob eventuell der Widerstand mit der Stromintensität variire, habe ich, soweit es die Methode erlaubt, die Widerstände bei möglichst verschiedenen Intensitäten bestimmt und keine merklichen Aenderungen gefunden. Kleine Aenderungen würden übrigens, wenn sie auch vorhanden wären, auf die Bestimmung der elektromotorischen Kraft und des Nutzeffektes, wie die folgenden Beobachtungen und Formeln ergeben, von verschwindendem Einfluſs sein. Auch die % erheblichen Fehler der Widerstandsbestimmungen, welche von der nothwendigen Einschaltung der vorher erwähnten Widerstände in Zweig 4 herrühren, bedingen wegen ihres sehr geringen absoluten Betrages keine erheblichen Fehler bei der Ermittelung der elektromotorischen Kraft und des Nutzeffektes.

Die Beobachtungen.

I. Elektromotorische Kraft.

Die elektromotorische Kraft wurde aus den beobachteten Gröfsen nach folgenden Formeln berechnet: $E = E' - IW$ (Ladung)

$e = e' + iw = i\,(r + w)$ (Entladung).

Von Zeit zu Zeit wurde auch die elektromotorische Kraft des offenen Elementes gemessen.

Die elektromotorische Kraft einer Ladungssäule hängt unter sonst gleichen Umständen von dem Zustande der Säule ab. Diese Abhängigkeit soll weiter unten besprochen werden. Bestimmt man ferner die elektromotorische Kraft während der Ladung, öffnet die Säule und bestimmt sofort wieder, läfst dann schnell den Entladungsstrom zirkuliren und bestimmt abermals, so ergeben sich merklich verschiedene Werthe. Um diese Verhältnisse kurz aussprechen zu können, wollen wir einen Strom, welcher die Ladungssäule durchfliefst, positiv nennen, wenn er sie ladet, negativ, wenn er sie entladet; es entspricht dann Strom Null der offenen Säule. Man kann dann kurz sagen: die elektromotorische Kraft hängt von der Stromintensität ab. Die Versuche ergaben bezüglich dieser

Abhängigkeit von der Stromintensität:

Wenn man von positiven Werthen der Stromintensität durch Null zu negativen Werthen übergeht, so nimmt die elektromotorische Kraft ständig ab. Verschiedene Male, so schnell als möglich hintereinander angestellte Messungen ergaben:

Strom positiv	Offene Säule	Strom negativ
2,28[1])	2,06	—
2,34	2,10	—
2,41	2,18	2,08
2,20	2,06	1,99
2,31	2,11	2,01
2,32	—	2,03.

[1]) Die in einer Horizontalreihe stehenden Zahlen gehören zusammen.

Je stärker der Entladungsstrom ist, um so schneller fällt die elektromotorische Kraft ab. Bei sehr grofser Entladungsintensität (J) kann sie in kurzer Zeit fast auf Null herabsinken, ohne dafs das Element völlig entladen ist. Sie kommt wieder zu ihrem Anfangswerthe zurück, wenn man den Entladungsstrom einige Zeit unterbricht (Rückstände).

Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft von dem Zustande des Elementes.

Der Zustand ist bestimmt:

1. durch die momentan in dem Elemente vorhandene, verfügbare, elektrische (chemische) Energie;
2. durch die gesammten Ladungen und Entladungen, die das Element bereits erfahren hat.

1. Mit dem Inhalte der Ladungssäule an verfügbarer Energie wächst die elektromotorische Kraft (E). Sie hat bei einer so vollständig als möglich entladenen Säule immer noch einen Werth von 0,2 bis 0,4 V. Im Anfange der Ladung steigt sie zunächst sehr schnell an (vgl. Fig. 3), und zwar je nach der Stromintensität (J) bis zu Werthen von 2 bis 2,4 V. Erhält man J konstant, so nimmt sie bei weiterem Laden langsam zu. Ihr Maximum habe ich nicht erreicht. Fällt J gegen Ende der Ladung ab, so kann es kommen, dafs auch E absinkt.

Zu Anfang der Entladung besitzt die elektromotorische Kraft (e) einen Werth von ungefähr 2 V. Wenn der Inhalt der Säule an verfügbarer Energie geringer wird, sinkt e ab. Dies geschieht zuerst langsam, später schnell (vgl. Fig. 4). Die allerletzten Reste von verfügbarer Energie giebt die Ladungssäule sehr langsam

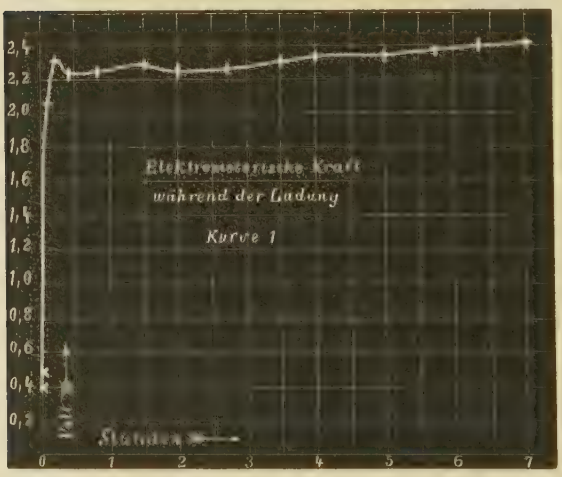
und mit einer sehr kleinen elektromotorischen Kraft ab.

2. Die elektromotorische Kraft ändert sich für sonst gleiche Umstände auch etwas mit dem Gebrauche der Ladungssäule.

Mittelwerthe der elektromotorischen Kraft.

Für die Technik haben hauptsächlich die Mittelwerthe der elektromotorischen Kraft für

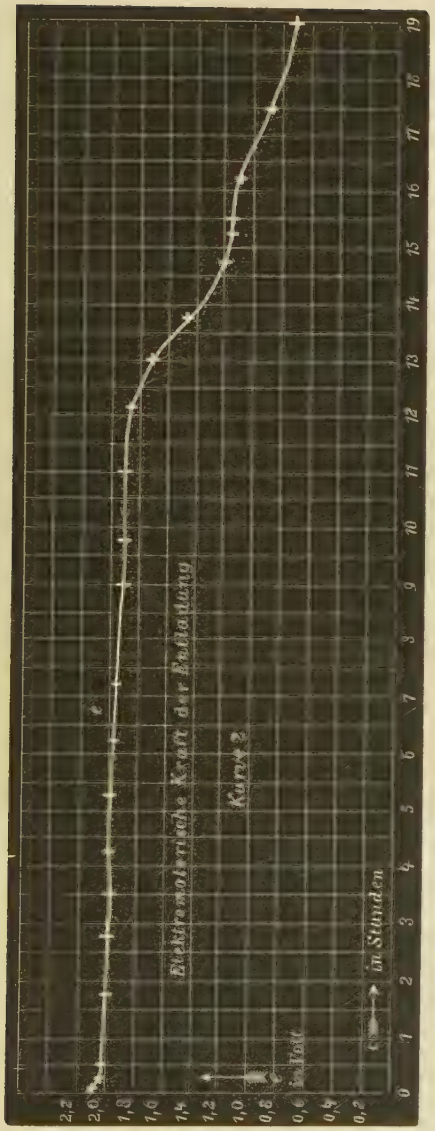
Fig. 3.



die Ladung und die Entladung Interesse. Zu ihrer Ermittelung wurde das Zeitintegral der elektromotorischen Kraft auf die weiter unten angegebene Weise für die Ladung bezw. Entladung graphisch berechnet und durch die Ladungs- bezw. Entladungsdauer dividirt.

a) Für die Ladung müssen nach dem Vorhergehenden die Mittelwerthe der elektromotorischen Kraft mehr oder minder von der Ladungs-

Fig. 4.


Elektromotorische Kraft der Radiolung
Kurve 2
Volt
in Stunden
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

intensität und der Stärke der Ladung abhängen, auch werden mit dem Gebrauche der Säule Veränderungen in denselben eintreten. Folgende Tabelle möge einige Beispiele für die Zahlenwerthe von (E_0), dem Mittelwerth bei der Ladung, geben:

Vers. No.	Element.	(J_0)	T	(E_0)
6	I	3,9	4^h	2,19
16	I	4,0	4^h	2,27
13	I	7,4	7^h	2,33
14	I	6,7	1^h	2,20
7	I	17,1	4^h	2,46
8	I	1,1	4^h	1,95.

Die beiden ersten Versuche zeigen, dafs (E_0) mit dem Gebrauche variirt, die beiden folgenden, dafs es auch von der Ladungsdauer (T) abhängt, und die beiden letzten, dafs es sich auch mit der Intensität (J_0) verändert. Die Mittelwerthe, welche bei den übrigen Versuchen sowohl mit Element I als auch mit den übrigen Elementen erhalten wurden, lagen alle zwischen 1,9 und 2,5 V.

b) Entladung. Weil die letzten Reste der aufgespeicherten Energie nur sehr langsam und mit einer sehr geringen elektromotorischen Kraft (e) abgegeben werden, sind sie für die direkte technische Verwendung werthlos und deshalb bei der Berechnung von (e_0), dem Mittelwerth bei der Entladung, nicht berücksichtigt worden. Der Werth von (e_0) beträgt etwa 2 V. Die äufsersten Werthe, welche sich für extreme Versuchsbedingungen ergaben, waren 1,84 und 2,22 V.

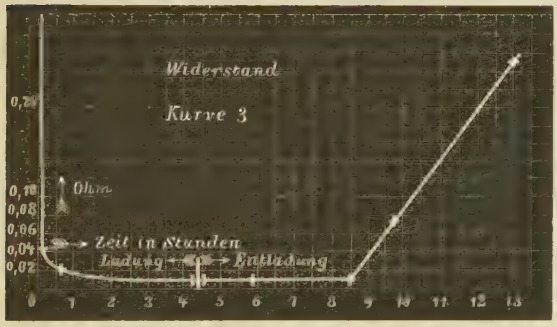
II. Widerstand.

Der Widerstand der Ladungssäulen verläuft im Allgemeinen so, wie Fig. 5 es angiebt.

Je nach den verschiedenen Versuchsbedingungen der Gröfse von J, T, i und t, der Stärke der Ladung und der Länge des Gebrauches modifizirt sich diese Kurve etwas.

Der Widerstand sinkt bei der Ladung schnell zu einem während des weiteren Verlaufes derselben nahezu konstanten Werthe. Die Gröfse dieses Werthes hängt etwas von den gesammten früheren Ladungen und Entladungen ab.

Fig. 5.



Er betrug für:

Element	I	0,009 bis 0,014 O.,
-	II	0,020 bis 0,025,
-	III	0,015,
-	IV	0,015.

Bei der Entladung bleibt w zunächst konstant, im weiteren Verlaufe steigt es, gleichzeitig mit dem stärkeren Abfalle von e, ziemlich proportional mit der Zeit an (vgl. Fig. 5). Die erwähnte Abnahme des Widerstandes zu Anfang der Ladung erklärt sich wohl dadurch, dafs an Stelle schlecht leitenden Bleioxydes leitendes $Pb\,O^2$ bezw. Pb tritt. Infolge des entgegengesetzten Vorganges nimmt w bei der Entladung zu.

III. Nutzeffekt.

Bei der Ladung einer Ladungssäule leistet der einer beliebigen Stromquelle entfliefsende Strom zwischen den beiden Polen der Säule die Arbeit:

$$L = \int J E' \, dT = \int J E \, dT + \int J^2 W \, dT$$
$$= L_e + L_w$$

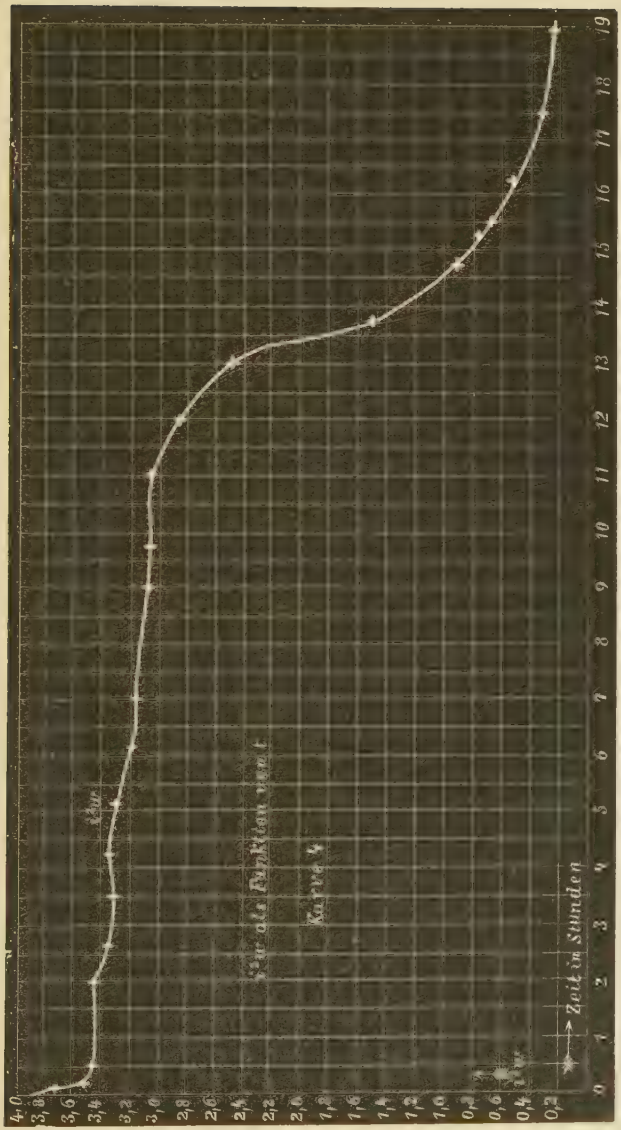
wo die Integrale über die gesammte Ladungsdauer zu erstrecken sind. L_e ist die elektrolytische Arbeit, L_w die im Element auftretende Joule'sche Wärme. Bei der Entladung der Säule durch einen Widerstand r wird, wenn keine Wirkungen nach aufsen stattfinden, die Arbeit geleistet:

$$l = \int e i \, dt = \int i^2 r \, dt + \int i^2 w \, dt = l_r + l_w;$$
$$(ir = e')$$

l_r äufsere Arbeit, l_w Joule'sche Wärme. Wie weit diese letzteren Integrale zu erstrecken sind, bedarf einer Erläuterung. Das Element giebt die letzten Reste von verfügbarer Energie so langsam ab, dafs man sich genöthigt sieht, die Entladung irgendwo abzubrechen. Der dafür geeignete Zeitpunkt wird durch die Art der Arbeitsabgabe des Elementes angezeigt. Die Kurve Fig. 6, die $i^2 w$ als Funktion von t darstellt, giebt an die Hand, die Entladung dann abzubrechen, wann $i^2 w$ den starken Abfall (vgl. Kurve) vollendet hat. Um mich zu überzeugen, was eigentlich noch in der Folgezeit an Arbeit von dem Elemente geleistet wird, habe ich bei zwei Versuchen noch zwei Tage weiter entladen und in dieser Zeit nur etwa 3 % der bereits vorher von dem Elemente geleisteten Arbeit herausbekommen.

Die Integrale L, L_w, l und l_w wurden auf folgende Weise ermittelt. Die zu integrirenden Funktionen wurden aus den beobachteten

Fig. 6.



Gröfsen berechnet und als Ordinaten zur Zeit als Abszisse aufgetragen. Die Endpunkte der Ordinaten wurden durch Kurven verbunden und die bezüglichen Flächenräume mit Hülfe eines Polarplanimeters, zuweilen, wenn die Kurve geeignet verlief, auch durch direkte Abzählung auf quadrirtem Papier gefunden.

Bei der Entladung könnte im günstigsten Falle von dem Elemente soviel Arbeit geleistet werden, als durch die Elektrolyse in ihm aufgespeichert wurde. Durch sekundäre Umstände geht aber ein Theil der letzteren Arbeit für die Entladung verloren. Das Verhältnifs der bei der Entladung wiedergewonnenen Arbeit zur elektrolytischen Ladungsarbeit heifse elektrischer Nutzeffekt oder Nutzeffekt kurzweg:

$$N = \frac{l}{L_e} .$$

Durch folgende zwei Umstände tritt ein Verlust der Säule an aufgespeicherter Energie ein. Erstens verbinden sich bei der Ladung nicht die gesammten Jonen chemisch mit dem Material der Elektroden, sondern sie entweichen zum Theil gasförmig. Die Stärke dieser Gasentwickelung ist von der Intensität und der Ladungsdauer abhängig. Zweitens finden lokale Ströme zwischen dem Blei und dem Bleisuperoxyd der Anode statt, wie Gladstone und Tribe zeigten [1]), wodurch ein mit der Versuchsdauer wachsender Theil des gebildeten Bleisuperoxydes wieder reduzirt wird. Da die Stärke dieser beiden Prozesse von der Ladungsintensität und der Versuchsdauer abhängt, so mufs auch der Nutzeffekt von letzteren abhängig sein. Ich ging darauf aus, diese Abhängigkeit zu untersuchen, um die für den

[1]) Nature, Bd. 25.

Nutzeffekt günstigsten Bedingungen aufzufinden. Zunächst arbeitete ich mit Element I, das, nach einigen Vorversuchen zu urtheilen, den höchsten Nutzeffekt gab. Intensität und Versuchsdauer wurden variirt. Der Nutzeffekt nahm aber im Verlaufe der Versuche auf eine Weise zu, dafs ich annehmen mufste, das Element habe sich verändert, was aus den folgenden Versuchen erhellt.

1. Abhängigkeit des Nutzeffektes vom Gebrauche der Ladungssäule.

Der Nutzeffekt (N) nimmt mit dem Gebrauche der Ladungssäule im Allgemeinen zu; dem Zerfall der Säule geht aber wieder eine Abnahme desselben voraus:

Element No.	Versuch No.	N	T (Ladungsdauer)	(Jo) (mittlere Ladungsintensität)	r (äufserer Entladungswiderstand)
I[1])	6	0,21	4 h	3,9	0,138
I	16[2])	0,47	4	4,0	0,135
I	20[3])	0,48	4	4,0	0,135
I	22[4])	0,28	4	4,2	0,118
II[5])	21	0,23	4	4,1	0,135
II	23[4])	0,32	4	4,0	0,113

1) Element I war vor diesem Versuche zunächst etwa zwei Monate zu Beleuchtungszwecken verwendet, dann nach einmonatlicher Ruhe etwa zehn Mal geladen und entladen worden.

2) Das Element war inzwischen etwa 20 Mal geladen und entladen worden.

3) Das Element war inzwischen vier Mal geladen und entladen worden.

4) Das Element war inzwischen 27 Mal geladen und jedes Mal nach einer Pause von 12 h wieder entladen worden. Element I zerfiel während des auf Versuch 22 folgenden Versuches.

5) Element II erhielt ich formirt von Tommasi und hatte es vor diesem Versuche längere Zeit zu verschiedenen Zwecken im Gebrauche.

Nachdem ich einmal die grofsen Veränderungen des Nutzeffektes mit dem Gebrauche des Elementes bemerkt hatte, schien mir eine weitere Untersuchung der Abhängigkeit desselben von der Ladungsintensität und der Ladungsdauer wenig Interesse zu bieten. Die bereits angestellten Versuche genügten indessen, obwohl sie wegen der Veränderlichkeit des Elementes nicht vollständig in dieser Richtung ausgenutzt werden konnten, zu zeigen, in welchen Grenzen Ladungsdauer und Intensität gehalten werden müssen, damit der Nutzeffekt nicht erheblich unter seinem höchsten Werthe zurückbleibt. Die vergleichbaren Versuche sollen im Folgenden dazu benutzt werden, um diese Grenzen zu bestimmen.

2. Abhängigkeit des Nutzeffektes von der Ladungsintensität.

Element	Versuch	(J_0)	N	T	r
I	7	17,1	0,24	4^h	1,136,
I	8	1,1	0,06	4	1,136.

Aus diesen beiden Versuchen ersieht man, dafs unter sonst gleichen Bedindungen bei $(J_0) = 17$ der Nutzeffekt viel gröfser ist, wie bei $(J_0) = 1$.

Element	Versuch	(J_0)	N	T	r
I	11	7,2	0,37	4^h	1,136
I	12	10,8	0,34	4	1,136.

Der Nutzeffekt ist also für $(J_0) = 7$ gröfser wie für $(J_0) = 11$. Mit dem Vorhergehenden zusammengenommen ergiebt sich: N mufs zwischen $(J_0) = 1$ und $(J_0) = 11$ ein Maximum haben.

Element	Versuch	(J_0)	N	T	r
I	16	4,0	0,47	4^h	0,135
I	17	6,6	0,49	4	0,195
I	20	4,0	0,48	4	0,135.

Für $(J_0) = 4$ ist N nur sehr wenig kleiner wie für $(J_0) = 7$; für $(J_0) = 7$ aber gröfser wie für $(J_0) = 11$.

Das Maximum des Nutzeffektes liegt also etwa zwischen 4 und 11 Ampère. Innerhalb dieser Grenzen schwankt der Werth von N nur wenig; sehr kleine Intensitäten wie sehr grofse mufs man beim Laden vermeiden.

3. Abhängigkeit des Nutzeffektes von der Ladungszeit.

Element	Versuch	T	N	(J_0)	r
I	11	4^h	0,37	7,2	1,137
I	13	7	0,40	7,4	1,136
I	14	1	0,45	6,7	1,142.

Da der Nutzeffekt mit dem Gebrauche des Elementes zunimmt, so kann derselbe von der Ladungsdauer innerhalb der gegebenen Grenzen von 1^h und 7^h bei einer Intensität von 7 Ampère nur wenig abhängig sein. Dasselbe ergiebt sich bei einer Intensität $(J_0) = 1$.

Element	Versuch	T	N	(J_0)	r
I	8	4^h	0,06	1,1	1,137
I	9	13	0,09	1,0	1,137.

4. Eine Abhängigkeit des Nutzeffektes von dem äufseren Entladungswiderstande läfst sich aus den angestellten Versuchen nicht erkennen.

5. Tritt zwischen Ladung und Entladung eine Pause ein, so erleidet das Element auch dann einen Verlust an verfügbarer Energie, wenn die Elektroden während dieser Pause aus der Flüssigkeit genommen werden.

Element	Versuch	T	(J_0)	r	N
I	10	4^h	6,9	1,137	0,10 [1])
I	11	4	7,2	1,137	0,37.

[1]) Zwischen Ladung und Entladung lag eine 14 stündige Pause, während der die Elektroden aus der Flüssigkeit genommen wurden.

6. Maximalwerth des Nutzeffektes.

Der höchste Werth des Nutzeffektes, den ich überhaupt erreicht habe, betrug **0,50**; er wurde bei Versuch 15 erhalten:

Element	Versuch	T	(J_0)	r	N
I	15	4^h	8,3	0,5	0,50.

In dem Element in Joule'sche Wärme umgesetzte Arbeit.

a. Ladung.

Beim technischen Gebrauche der Ladungssäulen mufs man auch darauf bedacht sein, das Verhältnifs der im Element in Joule'sche Wärme umgesetzten Arbeit (L_w) zur gesammten Ladungsarbeit (L) möglichst klein zu machen.

$\frac{L_w}{L}$ ist zunächst für eine kürzere Ladungsdauer gröfser wie für eine längere, wie folgende Beobachtungen zeigen:

T	(J_0)	$\frac{L_w}{L}$	Versuch	Element
1^h	6,7	0,139	14	I
4^h	6,9	0,055	10	I
7^h	7,4	0,047	13	I
4^h	1,1	0,089	8	I
13^h	1,0	0,017	9	I.

Ferner ist $\frac{L_w}{L}$ für sehr starke und für sehr schwache Ströme besonders grofs; es hat seine geringsten Werthe für diejenigen Intensitäten, für welche der Nutzeffekt sein Maximum hat.

T	J_0	$\frac{L_w}{L}$
4^h	17	0,22
4^h	11 bis 8	0,07
4^h	7 bis 4	0,03 bis 0,05
4^h	1	0,10.

Die Aenderungen von $\frac{L_w}{L} = \frac{\int J^2 W dT}{\int J E' dT}$ erklären sich leicht, wenn man das Verhalten des Widerstandes W und der Potenzialdifferenz E' ins Auge faſst.

b. Entladung.

Es ist noch von Interesse, das Verhältnifs der bei der Entladung im Elemente geleisteten Arbeit (L_w) zu der im äufseren Stromkreise geleisteten (L_r) zu kennen.

$\frac{L_w}{L_r}$ ist dem äufseren Widerstande nahe umgekehrt proportional; es hatte folgende Werthe, wenn zur Füllung des Elementes im Verhältnisse 1 : 10 verdünnte $S O^4 H^2$ benutzt wurde:

r	$\frac{L_w}{L_r}$	i_0
1,14	0,02 bis 0,03	1,7
0,50	0,04	3,8
0,19	0,11	9,4
0,11	0,17	13 .

Maximalinhalt der Ladungssäule an verfügbarer Energie.

Die meiste Arbeit gab Element I in Versuch 13 ab, nämlich rund 175 000 V. × A. × S. oder 18000 Kilogrammmeter. Es wog 8,1 kg, wovon 6 kg auf die Elektroden kommen. Auf 1 kg Bleigewicht wurden also rund 3000 Kilogrammmeter aufgespeichert. Besondere Versuche, um den Maximalinhalt der Säule an verfügbarer Energie zu finden, habe ich nicht angestellt. Aus Beleuchtungsversuchen glaube ich jedoch schliefsen zu dürfen, dafs ein Element vielleicht bis rund 20 000 Kilogrammmeter aufzuspeichern vermag.

Dauer der Brauchbarkeit des Elementes.

Element I war, ehe ich es bekam, zwei Monate lang zu Beleuchtungszwecken im Gebrauche gewesen und fast täglich geladen worden.

Während meiner Versuche wurden ihm bis zu seinem Zerfall etwa 1,2 Millionen Kilogrammmeter elektrische Energie durch die Ladungen zugeführt, was einem einmonatlichen Gebrauche mit täglich einmaliger Ladung entspricht. Das Element hatte also im Ganzen einen dreimonatlichen Gebrauch mit täglicher Ladung ausgehalten.

Werfen wir noch einen Blick auf die anderen Elemente.

Wir haben bei Element I gesehen, dafs es sich für eine praktische Verwendung der Ladungssäulen wesentlich darum handelt, extreme Werthe der Intensität und der Ladungsdauer zu vermeiden, dafs aber innerhalb ziemlich weiter Grenzen der Nutzeffekt mit den Versuchsbedingungen nicht sehr stark variirt. Die Gröfse dieser Extremwerthe für die übrigen Elemente mittels einer eigens zu diesem Zwecke angestellten längeren Reihe von Versuchen zu bestimmen, halte ich nicht für lohnend, sondern glaube, dafs sich jene Werthe während der praktischen Verwendung der Ladungssäule ergeben müssen. Ich habe mit den verschiedenen Elementen einen Induktionsapparat getrieben und öfters Drähte geglüht, wozu ich die Ladung unter variirenden Bedingungen vornahm. Unter den Versuchsbedingungen, die, nach dieser praktischen Benutzung zu urtheilen, am günstigsten erschienen, wurden dann mit den Elementen II, III und IV einzelne Nutzeffektsbestimmungen vorgenommen.

Element III zeigte sich beim Gebrauch in Bezug auf den Nutzeffekt als sehr geringwerthig im Vergleiche zu den anderen Elementen. Ein mit ihm angestellter Versuch ergab:

T	(J_0)	r	N
3^h	6,1	0,135	0,08.

Element II ergab:

T	(J_0)	r	N
4^h	4,1	0,135	0,23.

Um mich davon zu überzeugen, dafs N auch bei diesem Elemente von dem Gebrauch abhänge, habe ich dasselbe nach dem eben mitgetheilten Versuche 27 Mal geladen und immer nach einer Pause von 12^h wieder entladen. Wie schon Seite 21 bemerkt wurde, ergab sich eine Zunahme von N mit dem Gebrauche.

Element IV, das ich erst gegen Ende meiner Versuche erhielt, konnte, nach Beleuchtungsversuchen zu urtheilen, unter geeigneten Bedingungen nach einigem Gebrauch einen Nutzeffekt von etwa 50 % geben. Zunächst wurde mit ihm ein Versuch mit extrem grofser Ladungsintensität angestellt und doch ein ziemlich beträchtlicher Nutzeffekt erhalten:

(J_0)	T	r	N
21,4	$2,5^h$	0,30	0,20.

Unter den Versuchsbedingungen, die, nach dem Gebrauche zu urtheilen, für das Element am günstigsten erschienen, wurde dann ein weiterer Versuch gemacht.

T	(J_0)	r	N
4^h	3,6	0,12	0,405.

Das Element war, ehe ich es erhielt, noch gar nicht in Gebrauch gewesen und von mir vor dem Versuch etwa 10 bis 20 Mal geladen und entladen worden.

Zu der oben (S. 4) erwähnten Arbeit der Herren Allard, Potier, Le Blanc, Joubert und Tresca möchte ich noch einige Bemerkungen machen. Ein kurzer Bericht über dieselbe befindet sich C. r., 94, S. 600, ein genauerer in La lumière électrique, Bd. 6, No. 10, eine Uebertragung des letzteren ins Deutsche in der Elektrotechnischen Zeitschrift, 1882, S. 149. Diese Uebersetzung enthält gleichzeitig kritische Anmerkungen. Auch Herr Aron hat schon auf mehrere Unzulänglichkeiten der Arbeit hingewiesen[1]). Auf diese Kritiken möchte ich verweisen und hier nur einige Irrthümer, die durch die Resultate der vorliegenden Arbeit näher aufgeklärt werden, berühren.

Die Verfasser ziehen aus ihren Versuchen Schlüsse über die elektromotorische Kraft und den Widerstand ihrer Ladungssäulen, die nicht zulässig sind, weil übersehen wurde, dafs die elektromotorische Kraft der Säule bei offenem Strome einen anderen Werth hat als bei geschlossenem. An diese Schlüsse knüpfen sich dann weitere Folgerungen, welche die Verfasser zur Ansicht führen, dafs man, um einen guten Nutzeffekt zu erlangen, mit möglichst schwachen Strömen laden müsse, was nach meinen Versuchen nicht richtig ist.

Ferner ist in der Arbeit nichts darüber bemerkt, was vor dem Versuche mit der benutzten, aus 35 Elementen bestehenden Batterie geschehen war. Es ist aber angegeben, dafs dieselbe zu Anfang der Ladung bei offenem Strome eine elektromotorische Kraft von 72 V. besafs; sie war also wohl nicht vollständig entladen, denn sonst hätte sie bei offenem Strome wohl nur höchstens 14 V. gehabt. Die von

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1882, S. 226.

mir untersuchten Elemente hatten wenigstens nach vollständiger Entladung immer nur eine elektromotorische Kraft von 0,4 V. höchstens. Wieviel verfügbare Energie aber noch in der Batterie vorhanden war, läfst sich aus der angegebenen Zahl für die elektromotorische Kraft bei offenem Strome nicht schliefsen. Dies erhellt daraus, dafs die letztere immer noch 72 V. wie zu Anfang betrug, nachdem die Batterie schon die Hälfte ihrer Ladung empfangen hatte. Die Ladung fand nämlich in vier Abschnitten am 4., 5., 6 und 7. Januar statt: bei Beginn des dritten Abschnittes, am 6. Januar, betrug die elektromotorische Kraft der offenen Säule 72,1 V.

Ein einzelner Versuch ist übrigens bei der Veränderlichkeit der Ladungssäulen nicht von sehr grofsem Werthe, und ein dem mitgetheilten vorangehender Versuch vom 20. Oktober 1881 wurde, weil er einen zu geringen Nutzeffekt gab, unterbrochen. —

Noch liegt eine Arbeit von den Herren Prof. W. E. Ayrton und John Perry vor[1]). Die Verfasser haben auch den Umstand übersehen, dafs die elektromotorische Kraft bei offenem Strom einen anderen Werth hat, wie bei geschlossenem Strome. Leider läfst sich aber aus dem Berichte nicht entnehmen, ob dieses Versehen einen Fehler in der Berechnung des Nutzeffektes zur Folge hatte, da die Verfasser nicht angegeben haben, was sie unter Nutzeffekt verstehen. Für letzteren werden sehr hohe Werthe, 83 bis 90 %, angegeben. Die Verfasser ziehen eine Reihe von Schlüssen über den Widerstand und die elektromotorische Kraft ihrer Ladungssäulen, und kommen, weil sie den angeführten Umstand übersehen haben, zu

[1]) Phil. Mag. (V)., Bd. 14, S. 41.

fehlerhaften Resultaten, die theilweise mit denjenigen der Verfasser der vorigen Arbeit übereinstimmen.

Folgende Tabelle giebt eine Uebersicht über meine sämmtlichen Versuche, von denen die vergleichbaren im Obigen zu weiteren Schlüssen benutzt worden sind.

Ladung					Entladung				
No. des Elementes.	No. des Versuches.	T in Stunden.	$(\mathcal{J}_0)$	Le in 10^3 V. A. S.	r	t in Minuten.	l in 10^3 V. A. S.	(i_0)	N
I	2 [1]	10	6,9	800	0,22	123	224	10,1	0,28
I	5	1	19,4	110	0,132	5	7,1	13,2	0,06
I	6	4	3,9	122	0,138	15	26,0	13,0	0,21
I	7	4	17,1	533	1,136	590	130	1,8	0,24
I	8	4	1,1	33,7	1,137	12	2,0	1,7	0,06
I	9	13	1,0	95,3	1,137	48	8,6	1,6	0,09
I	10 [2]	4	6,9	225	1,137	178	33,7	1,6	0,105
I	11	4	7,2	235	1,137	435	87,8	1,7	0,37
I	12	4	10,8	363	1,136	647	126	1,7	0,35
I	13	7	7,4	434	1,136	900	175	1,7	0,40
I	14	1	6,7	51,3	1,142	128	23,0	1,6	0,45
I	15	4	8,3	276	0,500	303	137	3,8	0,50
I	16	4	4,0	133	0,135	36	62,0	13,5	0,47
I	17	4	6,6	219	0,195	93	108	9,4	0,49
I	20	4	4,0	132	0,135	39	63,7	13,2	0,48
I	22 [3]	4	4,2	141	0,118	27	39,5	13,2	0,28
III	18	3	6,1	161	0,135	7	13,6	14,7	0,08
II	21	4	4,1	138	0,135	21	31,6	12,6	0,23
II	23 [4]	4	4,0	126	0,113	23	40,8	14,3	0,32
IV	19	2,5	21,4	434	0,297	131	87,0	6,0	0,20
IV	24	4	3,6	109	0,118	25	44,1	14,8	0,405

[1]) Die Versuche 1, 3 und 4 sind weniger genau wegen Unregelmäfsigkeiten am Elektrometer.

[2]) Zwischen Ladung und Entladung lag eine 14 stündige Pause, während der die Elektroden aus der Flüssigkeit genommen wurden.

[3]) Die Ladungssäule war zwischen 20 und 22 27 Mal geladen und immer nach einer Pause von 12 h wieder entladen worden. Nach Versuch 22 zerfiel das Element.

[4]) Das Element war zwischen 21 und 23 27 Mal geladen und immer nach einer Pause von 12 h wieder entladen worden.

Vita.

Ich, Wilhelm, Franz, Ludwig Hallwachs, Sohn des Geheimerath Ludwig Hallwachs in Darmstadt, wurde daselbst am 9. Juli 1859 geboren. Meine Mutter Emilie, geborene Hoffmann, verlor ich schon im vierten Lebensjahr. Ich besuchte das Privat-Institut des Dr. Theodor Maurer in Darmstadt und dann das Gymnasium daselbst von Sexta ab. Nach bestandenem Abiturienten-Examen genügte ich vom Herbst 1877 bis Herbst 1878 meiner Militärpflicht. Herbst 1878 bezog ich die Universität Strafsburg, Ostern 1880 ging ich auf zwei Semester nach Berlin und setzte dann meine Studien in Strafsburg fort. Vorlesungen habe ich bei folgenden Herren Docenten gehört: Baumgarten, E. du Bois-Reymond, Braun, Christoffel, Fittig, Gerland, Helmholtz, G. Kirchhoff, W. Kohlrausch, Kummer, Kundt, Laas, Liebmann, Netto,

Rammelsberg, Reye, Vaihinger, Winnecke, Wroblewski. Allen diesen sage ich meinen besten Dank, insbesondere aber Herrn Prof. Dr. Kundt, der mir während meiner ganzen Studienzeit und bei der vorliegenden Untersuchung mit seinem Rathe stets auf das freundlichste beistand.